



УДК 553.04(262.5):(622.3.001.6:504.42)

О ГЛУБИННОЙ ПРИРОДЕ ДЕГАЗАЦИИ ДНА ЧЕРНОГО МОРЯ

Е.Ф. Шнюков¹, В.П. Коболев^{2*}

¹Отделение морской геологии и осадочного рудообразования НАНУ, Киев, Украина

²Институт геофизики им. С.И. Субботина НАНУ, Киев, Украина

*Відповідальний автор: e-mail vpkoboлев@ukr.net, тел. 050 493 44 45.

ABOUT THE DEEP NATURE OF DEGASSING BLACK SEA BOTTOM

E.F. Shnyukov¹, V.P. Kobolev^{2*}

¹Department of Marine Geology and Sedimentary Ore Formation of NASU, Kiev, Ukraine

²Institute of Geophysics. S.I. Subbotina of NASU, Kyiv, Ukraine

* Viewed by the author: e-mail vpkoboлев@ukr.net, tel. 050 493 44 45.

ABSTRACT

Purpose. Analysis of the origin of deep methane in the Black Sea bottom.

Methods. Analysis of the isotopic composition of methane carbon in the Black Sea megabasin, analysis of the phenomena of active gas evolution from the bottom of the Black Sea, geological interpretation of the shelf sections, analysis of the distribution of the depth sipes.

Findings. The article discusses the nature of active gas evolution in the Black Sea bottom. It is established that the thermodynamic regime, the limited amount of biomass in the earth's crust of the Black Sea, and the coincidence of gas outlets to the fractures of the consolidated crust and upper mantle testify to the abiogenic nature of methane. It is shown that microbial metagenesis in the thickness of Holocene sediments is not enough to provide such a powerful gas discharge of the bottom of the Black Sea megabasin.

Originality. Since the volume of hydrocarbons in the depths of the Earth is many times greater than the initial potential resources of the entire sedimentary cover, it should be considered as a promising resource of extraction.

Practical implications. Data are presented in favor of a deep concept of the origin of methane in the Black Sea bottom.

Keywords: Black Sea, deep methane, degassing of the Black Sea bottom, abiogenic nature of methane, geological fault, crust, mantle, gas evolution.

1. ВВЕДЕНИЕ

Существование явления дегазации Земли более 100 лет назад обосновал В.И. Вернадский (Вернадский, 1960). Наличие внешних оболочек Земли – гидросферы и атмосферы является главенствующим результатом выхода летучих веществ к поверхности Земли. При этом речь идет о двух ветвях дегазации. А именно, помимо извержения газов наземными и подводными вулканами, существуют еще и невулканическая, менее заметная, но, возможно, еще более масштабная холодная форма дегазации недр (Кропоткин, 1986; Лукин, Шумлянский, Дьяченко и др., 1994; Шестопалов, Макаренко, 2013).

Ярким свидетельством беспрецедентной по интенсивности холодной формы газовой разгрузки недр являются газовые сипы, факелы, фонтаны, обнаруженные на дне Черного моря. Последние, наряду с сероводородным заражением, представляют

собой уникальный средообразующий, экологический и ресурсный феномен этого нефтегазоносного мегабассейна (Starostenko, Rusakov, Shnyukov et al., 2010; Егоров, Артемов, Гулин, 2011; Шнюков, Коболев; 2013; Шнюков, Коболев, Пасынков, 2013; Шнюков, Янко, 2014).

Сегодня можно уверенно утверждать, что масштабы глубинной дегазации Земли на несколько порядков выше, чем газовые проявления залежей углеводородов осадочного чехла. Учитывая огромные масштабы дегазации мегабассейна Черного моря, нельзя изучать генезис и вести поиск залежей нефти и газа без учета абиогенного синтеза углеводородов. Анализ путей миграции глубинных флюидов, зон разгрузки глубинной энергии позволит разработать новую стратегию поиска залежей нефти и газа и нестандартно подойти к оценке запасов углеводородного сырья Черноморского нефтегазоносного мегабассейна (Лукин, 2015).

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Явление активного газовыделения со дна Черного моря известно достаточно давно. Во время Крымского землетрясения 11 сентября 1927 известный советский геолог, профессор С.П. Попов наблюдал между Севастополем и мысом Лукулл серию огромных вспышек огня. Их причиной явились выбросы метана в результате тектонических нарушений земной коры, которые вызвали это катастрофическое событие.

Вместе с тем факт существования дискретных газопроявлений со дна Черного моря впервые стал достоянием научной общественности только через 60 лет в 1989г. [Поликарпов, Егоров, 1989]. За прошедшие с тех пор более четверти века в результате проведения гидроакустических наблюдений в Черном море удалось обнаружить

около четырех тысяч газовых проявлений в виде многочисленных сипов, факелов и фонтанов [Егоров, Артемов, Гулин, 2011].

Газовые выходы зафиксированы практически по всему периметру Черного моря (рис. 1) и приурочены в основном к внешнему шельфу и верхней части материкового склона на глубинах 50-800м (рис. 2). Однако газовые сипы - не единственный источник выделения метана. Интенсивные, нередко взрывные выходы газа на поверхность фиксируются в грязевых вулканах. К настоящему времени в Черном море задокументировано более 60 грязевых вулканов, представляющие собой своеобразное проявление диапировой тектоники. Транспортировка грязевого материала осуществляется газо-флюидной смесью, вырывающейся под большим давлением со значительных глубин.

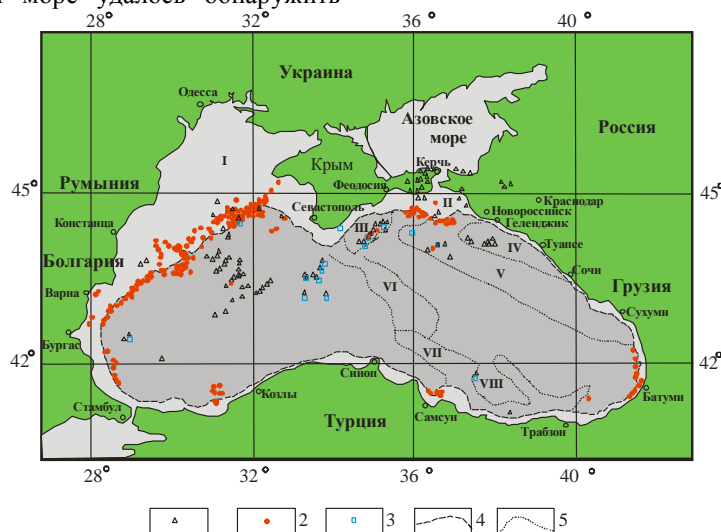


Рис. 1. Распределение выявленных к настоящему времени грязевых вулканов (1), газовых сипов (2) и газогидратов (3) в акватории Черного моря [Шнюков, Коболев, Пасынков, 2013]. 4 – граница шельфа, 5 – границы тектонических структур: I – Северо-западный шельф, II – Керченско-Таманский прогиб, III – прогиб Сорокина, IV – Туапсинский прогиб, V – поднятие Шатского, VI – хребет Андрусова, VII – хребет Архангельского, VIII – Гиресунская впадина.

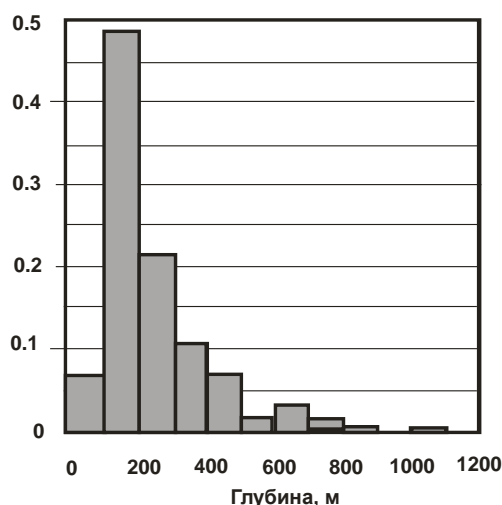


Рис. 2. Распределение сипов по глубине [Егоров, Артемов, Гулин, 2011].

Большая часть грязевых вулканов (20) приурочена прогибу Сорокина. В восточной части Черного моря грязевые вулканы зафиксированы на

акватории Керченско-Таманского прогиба (3), в пределах Туапсинской (8) и Гиресунской (5) впадин и на Валу Шатского (7) [Шнюков, Ступина, Рыбак и др., 2015]. Следует подчеркнуть, что в центральной части Западно-Черноморской впадины открыто 11 грязевых вулканов, то непосредственно в пределах Восточно-Черноморской впадины подобных проявлений до сих пор не зафиксировано. Над вершинами большинства глубоководных грязевых вулканов обнаружены признаки активности в виде периодических в межгодовом масштабе газовых фонтанов, которые по высоте превышали 1000м.

Используемые в настоящее время термины форм донных газовыделений, как в отечественных, так и зарубежных научных публикациях приводят к их различному толкованию. В этой связи представляется целесообразным упорядочить терминологию и систематизировать различные формы газопроявлений на морском дне.

Подобно передачи тепловой энергии из недр в виде рассеянного (кондуктивного) и

сосредоточенного (конвективного) потоков, можно выделить две принципиально подобные формы газовых потоков со дна морей и океанов. В первом случае, рассеянный по площади и редко образующий большие сконцентрированные скопления газ может быть биохимическим, в результате бактериальной трансформации органического вещества. В концентрированном виде скопления катагенного газа приурочены к зонам разгрузки углеводородов, мигрирующих из нижележащих горизонтов.

Рассеянная форма газоотдачи дна реализуется в виде пузырьковых струй, которые имеют непрерывный или пульсирующий характер, количество которых может достигать до 20 на квадратном метре дна моря. О значимости последней свидетельствуют результаты экспериментальных исследований, полученные на Болгарском шельфе, где с 1 м² поверхности дна из осадков выделяется от 21 до 167 см³ метана в год [Нефтегазогенетические исследования ..., 1984]. Относительно низкие значения плотности метанового потока установлены в районе подводного продолжения Мизийской плиты. В зоне краевого Нижнекамчатского прогиба, заполненного мощной толщей меловых и кайнозойских отложений (6-8 км и более), значение плотности потока метана оказались выше. При этом в накопительных пробах отмечены следы этана и этилена. Более высокая плотность газового потока обнаружена в районах тектонических нарушений, где также зафиксировано присутствие этана и этилена. Состав газа: метан - 98.72%, азот - 1,053%, изобутан - 0.15%, остальное - двуокись углерода, пропан и др. [Троцюк, 1982].



а



б



с

Рис. 3. Газовые проявления: а - одиночный сип, б - группа газовых факелов, с - мощный газовый фонтан.

Ко второй сосредоточенной (конвективной) форме газовых выходов со дна Черного моря относятся дискретные струйные проявления в виде (по мере увеличения мощности) сипов, факелов и фонтанов грязевых вулканов (рис. 3). В большинстве наблюдаемые газовые струи маломощные, высота их достигает 100-130 м, но чаще всего не превышает 50-70 м (рис. 3а, б). В то же время были зафиксированы

отдельные большие фонтаны высотой до 250-300 м, а иногда даже до 400-500 м (рис. 3с) [Шнюков, Коболев, Пасынков, 2013].

Наиболее богатой по распространению струйных метановых газовыделений в Черном море является северо-западная акватория Черного моря, а по некоторым оценкам - возможно, самой активной в мире. Практически все газовые выходы расположены в полосе шириной 45 км с двух сторон от бровки шельфа. В геоморфологическом отношении они приурочены в основном к устьевым каньонам палеорек Дуная, Днестра, Днепра и Каланчак, которые, в свою очередь, наследуют простирание разного рода разломов.

Учитывая ключевую роль разломов, как каналов доставки газов, на основе обобщения материалов сейсмических исследований [Туголесов и др., 1985; Казьмин и др., 2000; Хрящевская, Стомба, Стифенсон, 2007], а также анализа традиционных признаков разломов в потенциальных полях [Старостенко и др., 2005] с учетом основных геоморфологических элементов [Мельник, 1996] была построена структурно-тектоническая схема северо-западной части Черного моря (рис. 4).

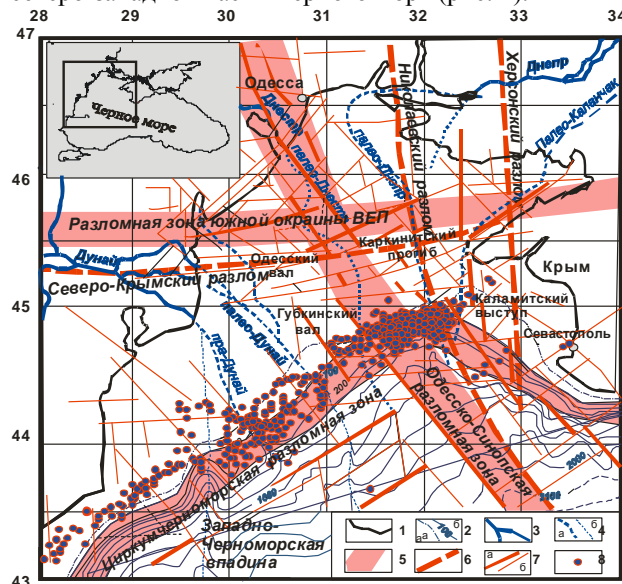


Рис. 4. Структурно-тектоническая схема северо-западной части Черного моря на фоне основных геоморфологических элементов (по материалам [Туголесов и др., 1985; Мельник, 1996; Казьмин и др., 2000; Старостенко и др., 2005; Хрящевская, Стомба, Стифенсон, 2007]. 1 – береговая линия; 2 – бровка шельфа (а), изобаты глубины моря (б); 3 – дельты рек; 4 – палео (пра) дельты рек: установленные (а), предполагаемые (б); 5 – разломные зоны мантийного заложения; 6 – разломы консолидированного фундамента; 7 – тектонические нарушения первого (а) и второго ранга (б); 8 – газовые выходы.

В результате комплексной интерпретации геологических и геофизических данных в северо-западной части Черного моря выделены две группы глубинных разломов. К первой группе относятся глубинные разломные зоны мантийного заложения,

разделяющие главные тектонические структуры. А именно, субширотная разломная зона, разделяющая южную окраину ВЕП и Скифскую плиту, фрагменты которой последовательно смещены к юго-востоку правыми сдвигами вдоль разломов северо-западного простирания. Субпараллельные границы ВЕП разломы прослеживаются на юго-западе площади исследований только в пределах Одесского и Губкинского валов.

К этой группе следует отнести Циркумчерноморскую разломную зону перехода от континентального склона к глубоководной ЗЧВ, осложненную депрессией переменной ширины. В ее пределах на Румынском шельфе выделяется разлом Печенига-Камена, который представляет собой на бровке шельфа высокоамплитудный сброс, за которым фундамент резко погружается до 11 км [Yegorova et al., 2010]. Эта зона представлена несколькими уступами с очень крутыми склонами, которые имеют по всем признакам тектоническую природу [Шрейдер, 2007], и повсеместно изрезана многочисленными подводными каньонами [Мельник, 1996]. Циркумчерноморская разломная зона имеет явно тектонический характер и представляет собой глубоководный разлом, по которому произошло значительное смещение фундамента и раздела М, резкое изменение мощности и структуры земной коры, дислокации глубоководных осадков. Этот разлом отличается и трассируется также к востоку от Крымского полуострова. Его рифтогенная природа непосредственно связана с формированием ЗЧВ в конце мела – начале палеогена [Коболев, 2017].

Отдельного внимания заслуживает ортогональная к указанным выше широтным, субмеридиональная Одесско-Синопская разломная зона, представляющая собой серию субпараллельных тектонических нарушений шириной не менее 30 км. Эта разломная зона мантийного заложения, ограничивающая с востока ЗЧВ, сыграла огромную роль в формировании мегавпадины Черного моря.

Ко второй группе относится ортогональная система глубоководных разломов консолидированного фундамента меридионального и широтного простирания. При этом известные субмеридиональные разломы, в частности Николаевский (Западно-Крымский) и Херсонский, берут свое начало на ВЕП и продолжают в пределах шельфа. Субширотный Северо-Крымский разлом прослеживается через остров Змеиный (Одесский вал) и Каркинитский прогиб. На указанной схеме представлены также тектонические нарушения разного ранга в консолидированной коре на основании сейсмического изучения строения осадочного слоя в совокупности с анализом градиентных особенностей распределения потенциальных полей.

Следует отметить, пространственную связь глубоководных разломов субмеридионального простирания с палеоречными долинами северо-западной части Черного моря. Прежде всего, это касается пространственного наследования палеоруслом Днепра Николаевского глубоководного разлома (см. рис. 4). А именно, Днепровский каньон

пространственно совпадает с Николаевским глубоководным разломом субмеридионального простирания. Последний, в этой зоне сдвига, примыкает к Одесско-Синопской разломной зоне глубоководного заложения и разделяет два типа подводного рельефа. Структурно-денудационный обрывистый тип рельефа развит к востоку от Николаевского глубоководного разлома, в то время как пологий структурно-аккумулятивный – характерен для западной части. Характерной особенностью структурно-денудационного восточного склона, является сильное расчленение рельефа и увеличение уклона поверхности с глубиной моря до 12°. На структурно-аккумулятивном, более пологом западном склоне широко развиты современные геологические процессы: подводные оползни, обвалы, суспензионные потоки [Wong et al., 2002]. В результате этих процессов происходит перенос и переотложение тонкодисперсного осадочного материала с материковой отмели через континентальный склон на абиссальную равнину глубоководной части моря [Lericolais et al., 2012].

При этом, восточный сдвиг Одесско-Синопской разломной зоны на склоне северо-западного шельфа Черного моря в пределах палеорусла Днепра может рассматриваться как отражение механизма «пулл-апат» [Занкевич, Шафранская, 2009]. Согласно законам физики, а именно принимая во внимание ротационные силы Кориолиса, все должно быть с точностью наоборот. Поэтому приведенное вышеуказанными авторами предположение о возможном пулл-апартовом сдвиговом механизме в пределах области сочленения субмеридиональной Одесско-Синопской, субширотной Циркумчерноморской разломных зон и Николаевского разлома в какой-то мере проливает свет на указанное несоответствие.

Анализ полученных данных показал, что латеральное распределение метановых сипов не случайно [Шнюков, Коболев, Пасынков, 2013]. Основная масса газовых выходов в пределах палеорусла Днепра сосредоточена на структурно-аккумулятивном, более пологом склоне к западу от Николаевского разлома.

Выходы газа встречаются в местах, где сконцентрированные потоки флюидов превышают вмещающий объем порового пространства, в результате чего метан просачивается через донные осадки в толщу воды [Judd, 2003]. При нормальных условиях, большая часть метана окисляется посредством консорциумов сульфатредуцирующих бактерий в анаэробных условиях или в зоне их аэробной активности [Michaelis et al., 2002]. Миграция флюидов осуществляется через тектонические нарушения в придонных осадочных горизонтах, зоны глубоких разломов и грязевые диапиры путем диффузии растворенного или свободного газа, или в виде геоморфологических сфокусированных потоков. Частично этот газ может быть газогидратным. При изменении давления и/или температуры газовые гидраты могут диссоциировать и тем самым подпитывать газовые сипы на дне моря, что в результате приводит к дестабилизации осадков.

Предельная глубина для большей части обнаруженных сипов составляет 725 м, которая более или менее соответствует зоне стабильности для чистого гидрата метана при придонной температуре (8,9°C) в этой части Черного моря [Nauds et al., 2006]. Это позволяет говорить о том, что газовые гидраты играют роль буфера для восходящей миграции газов и тем самым предотвращают просачивание метана в толщу воды.

Как уже было отмечено выше, струйные метановые газовыделения приурочены к палеодельтам рек, свалу глубин и геодинамическим узлам различного масштаба. С глубин до 250 м метан может достигать поверхности моря и поступать в атмосферу (рис. 5).

С больших глубин струи метана растворяются в водной толще. В водах растворено 80 млрд. м³ метана и это, несмотря на то, что воды рек, впадающих в Черное море, не содержат метан. Полный цикл обновления воды составляет 400-2000 лет. Все это свидетельствует о мощном постоянном подтоке углеводородов из недр.

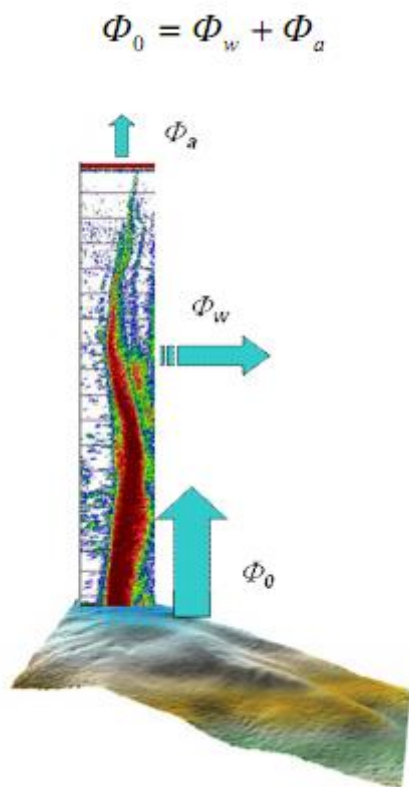


Рис. 5. Составляющие потока метана струйного газовыделения: Φ_0 - начальный поток, Φ_w - поток растворенного метана в водной толще, Φ_a - поток газообразного метана в атмосферу [Егоров, Артемов, Гулин, 2011].

Как показывают измерения у побережья Грузии, со дна Черного моря поднимается поток углеводородного газа дебитом 172 тыс. м³/сутки на участке $S = 16 \text{ км}^2$ [Егоров, Артемов, Гулин, 2011]. По лабораторным анализам в газе содержится 94.5% CH₄ и около 4.5% этана. То есть со дна Черного моря в сутки поступают миллионы кубических метров метана. Наличие холодных сипов в зоне

неустойчивости газообразной формы метана на глубинах более 750 м свидетельствует о существовании здесь в донных отложениях и водной среде нестационарных РТ-условий.

Следует отметить, что используемые для интегральных оценок газовой разгрузки дна методы баланса и моделирования обременены погрешностями и поэтому должны тестироваться дополнительными критериями. Известно, что при поступлении в поверхностный слой моря более 30 л/с газа теряется плавучесть судов, а при поступлении в атмосферу 150 л/с метана - возможно, его возгорание. Поэтому при полученной оценке газовой разгрузки дна в 900 м³/с и поступления в атмосферу потока метана в 390 м³/с [Ольштынский, 2006] следовало бы ожидать потопление судов по типу аварий в Бермудском треугольнике или регистрации фактов «горения» Черного моря. К счастью, таких аномальных событий в Черном море с 1927 года не наблюдается.

С другой стороны, при газовой разгрузке дна в 900 м³/с, годовой поток метана в морскую среду составит около 28 млрд. м³, что превышает годовую добычу метана Украиной. Можно предположить, что разработка технологии добычи такого факельного газа, могла бы избавить нашу страну от его импорта. Однако для обоснования эффективности материальных затрат при разработке такой технологии, газовая производительность факелов не должна вызывать сомнений.

Карбонатные сооружения. Интенсивные подводные наблюдения с использованием самого современного оборудования, включая подводные аппараты и дистанционно управляемые телероботы, позволили выявить новую для Черного моря форму жизни. Это симбиотическое сообщество анаэробных метаноокисляющих архей и сульфатредуцирующих бактерий, способных утилизировать значительную часть метана, выходящего из морского дна и депонировать его в виде массивных карбонатных сооружений. Последние играют роль своеобразного биогеохимического барьера, препятствующего поступлению этого парникового газа в водную толщу и атмосферу. По современным представлениям, такие микробные сообщества доминировали в древней биосфере около 3.5 млрд. лет назад, когда кислород в атмосфере еще отсутствовал, а основными компонентами окружающей среды был метан и сероводород [Blinova, Ivanov, Bohrmann, 2003].

Карбонатные образования, связанные с газовой разгрузкой недр, выявлены практически во всем диапазоне глубин сероводородной зоны Черного моря, в том числе ниже зоны стабильности газогидратов. В районе газовых сипов глубоководной части палеорусла Днепра вблизи верхней границы зоны стабильности газогидратов (глубина около 730 м) обнаружено поле карбонатных сооружений (рис. 6). Последние представляют особый интерес в связи с неустойчивым состоянием газогидратов на этой глубине и зависимости их дегазации от колебаний гидростатического давления, плотности, солёности и температуры придонного слоя воды, обусловленных

вариабельностью уровня моря, сезонными и климатическими условиями [Bohrmann, Schenck, 2002].

О природе метана в Черном море. Генерация, миграция и аккумуляция углеводородов является фундаментальной проблемой нефтегазовой геологии. В последнее время наметилась тенденция к сближению двух противоречивых сторон биогенной и абиогенной гипотезы. Объединяющим началом послужила идея В.И. Вернадского о глобальном геохимическом круговороте вещества на нашей планете. Идея круговорота позволяет совместить лучшие стороны двух существующих гипотез. Так биогенная гипотеза объясняет роль механизма преобразования органического вещества в нефть и газ на нисходящей ветви круговорота, а абиогенная гипотеза - на восходящей. Таким образом, совокупность двух данных концепций можно рассматривать как взаимодополняющие систему представлений, которые отражают два основных механизма формирования углеводородов в процессе глобального геохимического круговорота.



Рис. 6. Поле карбонатных сооружений, обнаружено в районе газовых сипов глубоководной части палеоруслу Днепра вблизи верхней границы зоны стабильности газогидратов (глубина около 730 м). Фотографии сделаны с помощью телероботов (Егоров, Артемов, Гулин, 2011)

В настоящее время существует две точки зрения на генезис газовыделений в Черноморской мегавпадине. С одной стороны они связываются с разгрузкой глубинных источников термального газа, а с другой - с биохимическим окислением органического вещества донных отложений Черноморской мегавпадины. В зависимости от генезиса метан может иметь различное соотношение

стабильных изотопов ^{12}C и ^{13}C . В природе среднее содержание ^{12}C составляет 98.892%, а ^{13}C - 1.108%, соответственно.

Однако в результате метаболизма микроорганизмов за счет изотопного эффекта происходит фракционирование изотопов в сторону обеднения метана его тяжелым стабильным изотопом. Для характеристики этого соотношения используется показатель δ^{13} (Лейн, Иванов, 2009). Величина этого показателя до уровня -50-60‰ соответствует термогенному метану, а в пределах от -60 до -80‰, указывает на биогенное происхождение метана. Диаграмма изотопного состава углерода метана для различных биогеохимических и геологических структур Черноморской мегавпадины, заимствованная из (Лейн, Иванов, 2009), приведена на рис. 7.

Как следует из диаграммы, метан с верхнеголоценовых осадков (1), а также растворенный метан холодных сипов (2) и пузырьковый метан газовых струй (3) по соотношению легкого и тяжелого стабильных изотопов углерода (δ^{13}) имеют биогенный генезис. С этим трудно не согласиться. Вместе с тем правая сторона приведенной диаграммы показывает, что растворенный метан анаэробной водной толщи (4), водной толщи в зоне хемоклина (5), кислородной водной толщи (6), растворенный каталитический метан (7) и метан грязевых вулканов (8) соответствует термогенному метану.

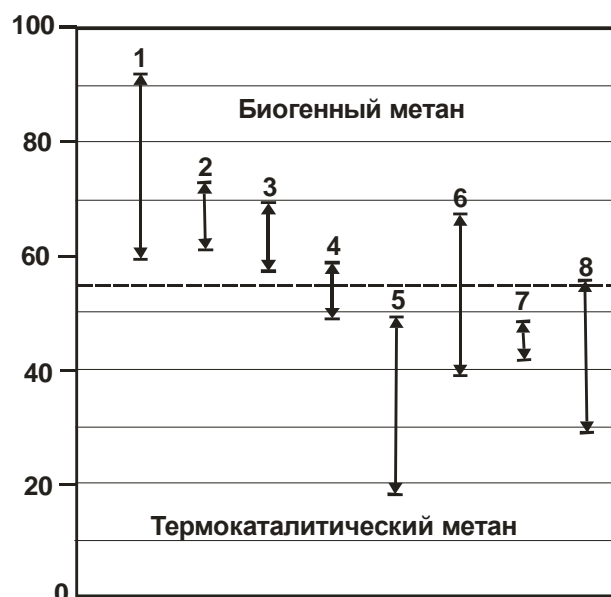


Рис. 7. Изотопный состав углерода метана Черноморской мегавпадины (по (Лейн, Иванов, 2009)). 1 - метан с верхнеголоценовых осадков, 2 - растворенный метан холодных сипов, 3 - пузырьковый метан газовых струй, 4 - растворенный метан анаэробной водной толщи, 5 - растворенный метан водной толщи в зоне хемоклина, 6 - растворенный метан кислородной водной толщи, 7 - растворенный каталитический метан, 8 - метан грязевых вулканов

Приведенные материалы, по нашему мнению, в целом свидетельствуют, что метан струйных газовыделений может относиться к смешанному

типу. Тем более, данные по содержанию гомологов метана (изобутана, этана, пропана), в газовом составе на отдельных участках локализации сипов в региональном масштабе также указывают на термогенный метан. По результатам сейсмоакустических исследований было установлено, что в толще подстилающих осадков под холодными сипами с метаном смешанного или термогенного генезиса, как правило, располагаются неотектонические нарушения, представляющие собой каналы поступления глубинного газа. И, наоборот, под сипами с биогенным метаном таких каналов не обнаружено, что может свидетельствовать об их принадлежности к рассеянной форме газового потока (Коболев и др., 1999).

Следует также подчеркнуть, что наличие струйных газовыделений в пределах глубин 900-1000 м и более 1800 м не может быть объяснено в рамках биогенной концепции генезиса углеводородов. На таких глубинах при температуре придонного слоя воды около 9°C, и солености более 22.5% в метан может существовать только в газогидратной форме.

Как известно (Horita, Bemdt, 1999), по показателям δD и $\delta^{13}C$ выделяется четыре источника CH_4 : биогенная ферментация - разложение неглубокого залегания органического материала; биогенное или химическое восстановление двуокиси углерода (CO_2) в метан (CH_4); термогенный органический или неорганический процесс; смешивание различных типов метана из различных источников.

Имеющиеся изотопно-геохимические данные (Whiticar, 1999; Лукин, 2003) свидетельствуют о преобладании в Черном море термогенного метана.

Термогенный метан обнаружен в разных геоморфологических структурах - на шельфе, на континентальном склоне и в прогибе (Peckmann, Reimer, Luth, 2001; Klauke et al., 2006; Stadnitskaia et al., 2007). Он всегда присутствует в ассоциации с биогенным метаном в различных пропорциях. Общее распространение можно объяснить только в том случае, если биогенный метан является вторичным, который образовался за счет термогенного, благодаря активности метаноокисных и сульфатредуцирующих бактерий (Reitner et al., 2005). Для формирования термогенного метана из полимерной органического вещества (керогена) нужна температура 120-150°C (Tassi et al., 1991), а для трансформации мокрого газа в сухой - не менее 200°C (Waples, 1980), тогда как даже самые термостойкие микробы могут существовать только при 110°C (Gold, 1993). По экспериментальным данным карбонатные постройки в Черном море образовались при температуре около 9°C, что соответствует температуре на дне этой акватории (Mazzini et al., 2008).

По расчетам, в водах Черного моря растворено огромное количество метана (от 54 до 96 Tg), однако скорость его анаэробного окисления составляет 30 Tg в год (McGinnis, Lorke, Kipfer, 2005). Отсюда следует, что за несколько лет метан водной толщи полностью обновляется и для его компенсации требуется мощный подток с нижележащих горизонтов. Более того, воды Черного моря постоянно обновляются за счет поставки пресной воды реками с окружающим суши и соленой воды из Средиземного моря через Босфор, которая не содержит метан. По данным разных авторов, полный цикл замены воды длится от 410 до 2000 лет.

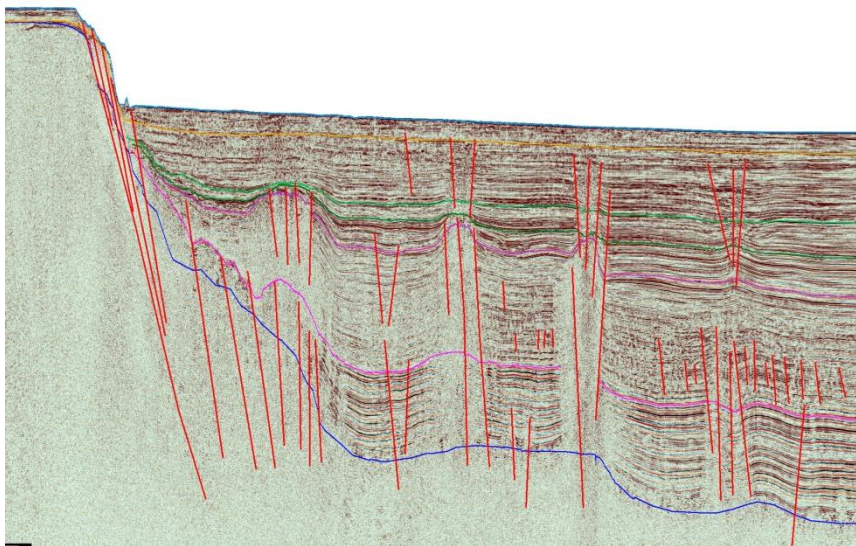


Рис. 8. Пример геологической интерпретации временного разреза по субмеридиональному профилю от северо-западного шельфа до ЗЧВ (Сенин, Никишин, Амелин и др., 2012)

Результаты радиоизотопного определения возраста карбонатных образований Черного моря показывают, что утечка газа из его дна начался не менее 29200-36500 лет назад (Егоров, Артемов, Гулин, 2011). Таким образом, с момента появления газовых выходов вода в Черном море обновлялась,

по крайней мере, 15 раз. Итак, баланс метана в воде может поддерживаться только за счет мощной дегазации земных недр.

Глубинная природа метана подтверждается также газовыми выходами над кристаллическими породами Ломоносовского подводного массива южнее Крыма,

а также изотопным и химическим составом карбонатных образований в северо-западной части моря (Шнюков, Коболев, Пасынков, 2013).

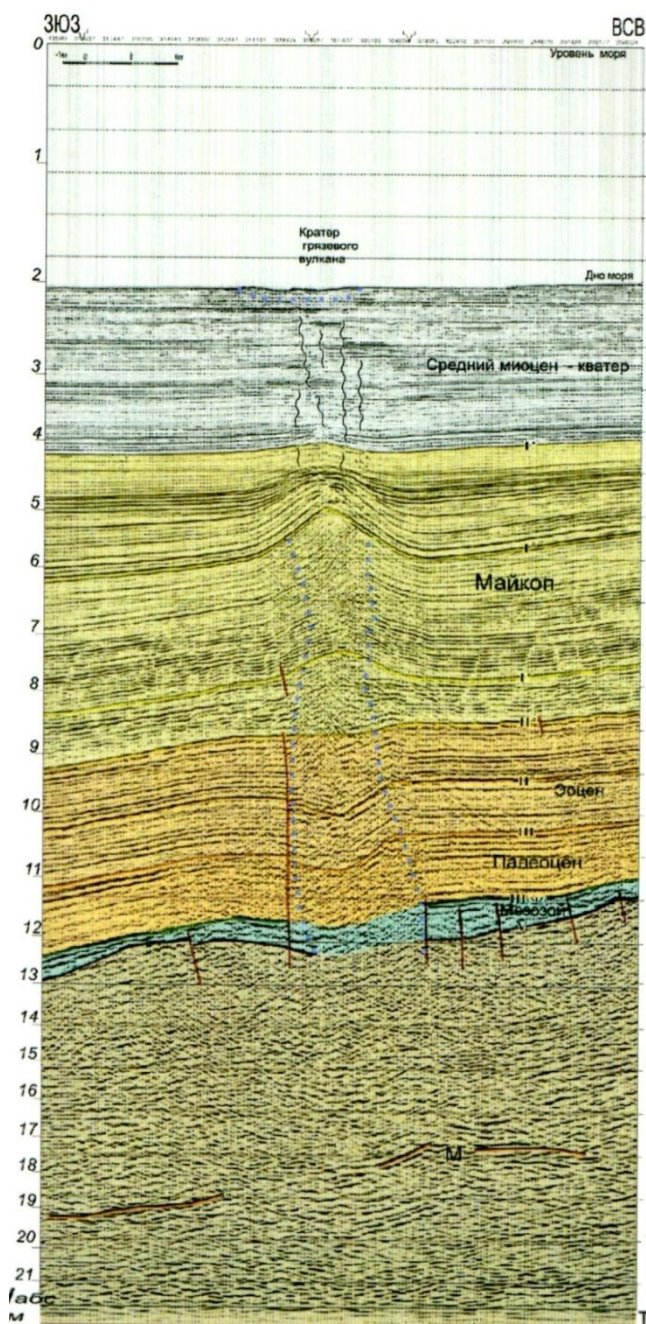


Рис. 9. Фрагмент временного сейсмического разреза в зоне грязевого вулкана с координатами $43^{\circ}39.9'$ и $33^{\circ}09.29'$ (Шнюков, Коболев, Пасынков, 2013)

В целом, в осадочной толще Черноморской мегавпадины существуют сотни грязевулканических каналов, а возможно, и других путей – тектонических нарушений, по которым мощные потоки глубинной углеводородной дегазации поступают к поверхности дна. Если к этому добавить бесчисленные разрывные нарушения различных уровней, то будет понятна схема существования своеобразной «кровеносной системы» осадочного чехла, в котором циркулируют флюиды. В качестве иллюстрации вышесказанного на рис. 8 приведен пример геологической

интерпретации временного сейсмического разреза по субмеридиональному профилю, пересекающему западную часть Черного моря от северо-западного шельфа до ЗЧВ. Обилие тектонических нарушений, которые корнями уходят в фундамент, является ярким свидетельством взаимодействия флюидных потоков с осадочным чехлом.

Как показывают сейсмические материалы, корни грязевых вулканов уходят иногда в мантию. Для одного из грязевых вулканов Черного моря (рис. 9) был обнаружен канал дегазации – корни вулкана, расположенные ниже поверхности Мохо (21 км от поверхности дна).

Можно предположить, что мощный поток флюидов, вырываясь из мантии, как бы ослабляет в своем прохождении всю осадочную толщу и способствует возникновению диапировых структур в майкопских отложениях.

Другими словами, не диапиры в майкопских глинах создают грязевые вулканы, а, наоборот, флюидный локализованный поток способствует их возникновению. Об этом свидетельствует существование положительных структур на всем пути флюидного потока – во всей разновозрастной осадочной толще.

Особый интерес представляет обнаружение волновода в фундаменте северо-западного шельфа Черного моря по результатам переинтерпретации материалов ГСЗ (Баранова, Егорова, Омельченко, 2008; Yegorova, Gobarenko, 2010; Yegorova, Baranova, Omelchenko, 2010) и петрофизического термобарического моделирования (Корчин, 2017).

Как известно, наличие волноводов (зон пониженных скоростей в консолидированной земной коре) связано с зонами глубинных разломов различной геодинамической природы и морфологии. В данном случае основным фактором формирования волновода является высокоамплитудный сброс, который отделяет континентальный блок шельфовой зоны от глубоководной впадины (Баранова, Егорова, Омельченко, 2008).

Особенности формирования и геодинамической эволюции Черноморской мегавпадины позволяют предполагать широкое развитие таких разуплотненных зон в разновозрастном КФ, связанных с зонами рифтогенных разломов, а на локальном уровне – с проявлениями термоусадки и тектоно-кессонного эффекта, обусловленного тектоническим поднятием отдельных блоков фундамента и формированием интрузий (Лукин, 1997).

Данные комплексного геолого-геофизического изучения недр Черного моря подтверждают их связь с восходящими потоками глубинных флюидов. В зависимости от конкретных структурно-тектонических и формационных условий, эти потоки сопровождаются тем или иным признаками их взаимодействия с осадочным чехлом (грязевой вулканизм и различные проявления грязевого диапиризма, формирования газогидратных скоплений и др.).

В краевой части шельфа и на континентальном северо-западном склоне Черного моря по

сейсморазведочных данным установлены признаки существования больших выступов, вероятно разуплотненных кристаллических и метаосадочных пород.

Связь этих выступов с восходящими потоками глубинных флюидов в зависимости от конкретных структурно-тектонических и формационных условий подтверждается теми или иными признаками их взаимодействия с осадочным чехлом (грязевой вулканизм и различные проявления диапиризма, формирования газогидратных скоплений и др.).

В тектоническом отношении эта область находится в пределах трансчерноморской Одесско-Синопского разломной зоны, где домеловые отложения образуют поднятия, осложненные серий разрывных нарушений, над которыми зафиксированы десятки грязевых вулканов.

Следует отметить, что, такие поднятия играют особую роль как в локализации биогенно-карбонатных сооружений и обломочно-карбонатных аккумулятивных тел, так и в их вторичных преобразованиях (перекристаллизация, доломитизация и др.) с образованием дополнительной пористости (Лукин, 1997; Старостенко и др., 2012).

3. ВЫВОДЫ

Термодинамический режим, ограниченное количество биомассы в земной коре Черного моря и приуроченность газовых выходов к разломам консолидированной коры и верхней мантии свидетельствуют в пользу абиогенной природы метана. Таким образом, есть все основания считать, что микробного метагенеза в толще голоценовых осадков недостаточно для обеспечения такого мощной газовой разгрузки дна Черноморской мегавпадины. Объем углеводородов в глубинах Земли во много раз превышает начальные потенциальные ресурсы всего осадочного чехла. По мере проведения исследований все больше аргументов свидетельствуют в пользу глубинной концепции.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Вернадский В.И. Избранные сочинения. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – Т. 2. – С. 388–482., Вернадский В.И. О газовом обмене земной коры // Изв. Император. Акад. наук. – 1912. – Т. 141. – С. 71
2. Егоров В.Н., Артемов Ю.Г., Гулин С.Б. Метановые сипы в Черном море – средообразующая и экологическая роль. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. – 405 с. Егоров, Артемов, Гулин, 2011
3. Занкевич Б. А., Шафранская Н. В. Тектоническая позиция зоны газовых факелов северо-западной части Черного моря // Геология и полезные ископаемые мирового океана. – 2009. – № 3. – С. 35–54.
4. Казьмин В. Г., Шрейдер А. А., Финетти И, Мелихов В.Р., Булычев А. А., Гилад Д. А., Андреева О. И., Шрейдер Ал. Ав. Ранние стадии развития

- Черного моря по сейсмическим данным / // Геотектоника. – 2000. – № 1. – С. 45–60.
5. Коболев В.П. Структурно-тектонические и флюидо-динамические аспекты глубинной дегазации мегавпадины Черного моря // Mining of Mineral Deposits, Volume 11 (2017), № 1. - С. 31-49.
6. Коболев В.П., Корчин В.А., Буртный П.А., Русаков О.М. Сейсмическая структура континентального подножия Горного Крыма // Геология и полезные ископаемые Черного моря. - Киев: НАН Украины. - 1999. - С. 294-296.
7. Кропоткин П. Н. Дегазация Земли и генезис углеводородов // Журн. Всесоюз. хим. о-ва им. Д. И. Менделеева. – 1986. – Т. 31, вып. 5. – С. 540–547.
8. Лейн А.Ю., Иванов М.В. Биохимический цикл метана в океане. М.: Наука, 2009. – 575 с. Лейн, Иванов, 2009
9. Лукин А.Е. Изотопно-геохимические индикаторы углекислой и углеводородной дегазации в Азово-Черноморском регионе // Геол. журн. – 2003. – № 1. – С. 59-73
10. Лукин А.Е. Система "плюм – глубоководные сегменты нефтегазоносных бассейнов" – неисчерпаемый источник углеводородов // Геологічний журнал, №2 (315), 2015. С. 7-20.
11. Лукин А. Е., Шумлянский В. А., Дьяченко Г. И., Ивантишина О. М. Проблемы холодной дегазации Земли. – Киев: Изд. ИФИ Укр. науч. асоц., 1994. – 80 с
12. Мельник В.И. Мезаформы рельефа материкового склона Черного моря / Мельник В.И.// Геологический журнал. - 1996. - №1-2. - С. 124-131.
13. Нефтегазогенетические исследования Болгарского сектора Черного моря /Под ред. А.А. Геодекяна, В.Я. Троцюка, И. Монахова. София: Изд-во БАН, 1984. – 290 с.
14. Олыштынский С.П. Эмиссия газа в атмосферу с поверхности Черного моря // Междунар. научн. конференция «Фундаментальные исследования важнейших проблем естественных наук на основе интеграционных процессов в образовании и науке» - Севастополь, 2006.
15. Полікарпов Г.Г., Єгоров В.М. Виявлено активні газовиділення з дна Чорного моря // Вісн. АН УССР. – 1989. - №10. – С. 108-111.
16. Сенин Б.В., Никишин А.М., Амелин Н.В. и др. Отчет по программе морских научных работ «Изучение геологического строения докайнозойских отложений и глубинной структуры бассейна Черного моря», 139 л. текста, 65 рис., табл. 6/12 л, граф. прил. 38, библи. 78. ОАО «Союзморгео», Геленджик, 2012.
17. Старостенко В.И., Пашкевич И.К., Макаренко И.Б., Русаков О.М., Кутас Р.И., Легостаева О.В. Разломная тектоника консолидированной коры северо-западного шельфа Черного моря // Геофиз. журн. – 2005. – № 2. – С. 195-207.
18. Троцюк В.Я. Прогноз нафтогазоносності акваторій. М.: Недра, 1982. - 200 с.
19. Туголесов Д.А., Горшков А.С., Мейснер Л.Б. и др. Тектоника мезокайнозойских отложений Черноморской впадины. — М.: Недра, 1985. — 215 с.

20. Хрящевская О.И., Стомба С.Н., Стифенсон Р.А. Одномерное моделирование истории тектонического погружения Азовского и северо-западного шельфа Черного моря в мел-неогеновое время // Геофизический журнал. – 2007. – т. 29. № 5. – С. 3-24.
21. Шестопапов В.М., Макаренко А.Н. О некоторых результатах исследований, развивающих идею В.И. Вернадского о «газовом дыхании» Земли. Статья 1. Поверхностные и приповерхностные проявления аномальной дегазации Земли // Геол. журн. 2013. № 3. – С. 7-25.
22. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Пасынков А.А. Газовый вулканизм Черного моря. Киев: Логос, 2013. – 384с.
23. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П. Струйные газовыделения дна Черного моря – уникальный средообразующий, экологический и ресурсный феномен // Геология и полезные ископаемые Мирового океана, 2013, №3. С. 134-140.
24. Шнюков Е.Ф., Ступина Л.В., Рыбак Е.Н. и др. Грязевые вулканы Черного моря. К.: ГНУ ОМГОР, Логос. 2015. – 259с. Шнюков, Ступина, Рыбак и др., 2015
25. Шнюков, Е.Ф., Янко В.В. Газоотдача дна Черного моря: геолого-пошукове, екологічне і навігаційне значення. Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки. 2014. Т. 19, Вип. 4(23), С. 225-241.
26. Шрейдер Ал. А. Эволюция склона погребенной котловины Черного моря // Океанология. 2007. Т.47. N 1. С.102-115.
27. Blinova V.N., Ivanov, M.K., and Bohrmann, G., Hydrocarbon gases in deposits from mud volcanoes in the Sorokin Trough, north eastern Black Sea // Geo-Marine Letters, 2003. – v. 23. – P. 250-257.
28. Bohrmann G, Schenck S (2002) GEOMAR Cruise Report M52/1, MARGASCH, RV Meteor, marine gas hydrates of the Black Sea. GEOMAR, Kiel.
29. Gold T. The origin of methane in the crust of the Earth. In: Howell, D.G. (Ed.). The Future of Energy Gases. United States Government Printing Office. – Washington, 1993. – P. 57-81.
30. Horita J., Bemdt M.E. A "biogenic" methane formation and isotopic fractionation under hydrothermal conditions // Science. – 1999. – 285. – P. 1055-1057
31. Judd, A.G., 2003. The global importance and context of methane escape from the seabed. Geo Mar. Lett. 23, 147– 154.
32. Klauke I., Sahling H., Weinrebe et al. Acoustic investigation of cold seeps offshore Georgia, eastern Black Sea // Marine Geology. – 2006. – 231. – P. 51-67;
33. Lericolais G., Bourget J., Popescu I., Jermannaud P., Mulder T., Jorry S., Panin N. Late Quaternary deep-sea sedimentation in the western Black Sea: New insights from recent coring and seismic data in the deep basin // Global and Planetary Change, 2012. - doi:10.1016/j.gloplacha.2012.05.002.
34. Mazzini A., Ivanov M.K., Nermoen A., Sveden H. Complex plumbing systems in the near subsurface: geometrics of authigenic carbonates from Dolgovskoy mound (Black Sea) constrained by analogue experiments // Mar Pet Geol. – 2008. – № 6. – P. 457-472.
35. McGinnis D.F., Lorke A., Kipfer R. Upward flux of methane in the Black Sea: Does it reach the atmosphere? // Environmental Hydraulics and Sustainable Water management. – London: Taylor & Francis Group. – 2005. – P. 423-429.
36. Michaelis, W., Seifert, R., Nauhaus, K., Treude, T., Thiel, V., Blumenberg, M., Knittel, K., Gieseke, A., Peterknecht, K., Pape, T., Boetius, A., Amann, R., Jørgensen, B.B., Widdel, F., Peckmann, J., Pimenov, N.V., Gulin, M.B., 2002. Microbial reefs in the Black Sea fuelled by anaerobic oxidation of methane. Science 297, 1013–1015.
37. Nauds L., Greinert J, Artemov Yu, Staelens P, Poort J., Van Rensbergen P, De Dattist M. Geological and morphological setting of 2778 methane seeps in the Dniepr paleo-delta, northwestern Black Sea // Marine Geology. – 2006. – 227. – P. 177-199.
38. Peckmann J., Reimer A., Luth U. Methane-derived carbonates and authigenic pyrite from the northwestern Black Sea // Marine Geology. – 2001. – № 1-2. – P. 129-150.
39. Reitner J., Packmann J., Reimer A. et al. Methane-derived carbonate build-ups and associated microbial communities at cold seeps on the Lower Crimean shelf (Black Sea) // Facies. – 2005 – №1. – P. 66-79
40. Stadnitskaia A., Ivanov M.K., Poludetkin E.N. et al. Sources of hydrocarbon gases in mud volcanoes from the Sorokin Trough, NE Black Sea, based on molecular and carbon isotopic compositions // Marine and Petroleum Geology. – 2007, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2007.08.001
41. Starostenko V. I., Rusakov, O. M., Shnyukov, E. F., Kobolev, V. P., Kutas, R. I. Methane in the northern Black Sea: Characterization of its geomorphological and geological environments. // Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform. Geological Society, London, Special Publication, 340. 2010. P. 57-75.
42. Tassi F., Fiebig J., Nocentini M., Vaselli O. Origins of methane in volcanic and hydrothermal gas discharges as inferred from the chemical and isotopic signature of n-alkanes. – 1991. – 38. – P. S1189-S1210
43. Waples D.W. Time and temperature in petroleum formation: Application of Lopatin's method to petroleum exploration // AAPG Bulletin. – 1980. – 64. – P. 916-926
44. Whiticar M.J. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane // Chemical Geology. – 1999. – 161. – P. 291-314;
45. Wong, H.K., Ludmann, T., Panin, N., Konerding, P., Dinu, C., 2002. Northwestern Black Sea: Upper Quaternary water level and sedimentation. In: Briand, F. (Ed.), Turbidite Systems and Deep-Sea Fans of the Mediterranean and the Black Seas, CIESM Workshop series, vol. 17. Monaco, pp. 85–89.
46. Sosson, M., Kaymakci, N., Stephenson, R., Bergerat, F. and Starostenko V. (eds) Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform. Geological Society, London, Special Publications, 2010, 340, c. 43-56.

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Аналіз походження глибинного метану дна Чорного моря.

Методика. Аналіз даних ізотопного складу вуглецю метану Чорноморської мегавпадини, аналіз явищ активного газовиділення з дна Чорного моря, геологічна інтерпретація розрізів шельфу, аналіз розподілу сипів по глибині.

Результати. У статті обговорюються питання природи активного газовиділення дна Чорного моря. Установлено, що термодинамічний режим, обмежена кількість біомаси в земній корі Чорного моря і приуроченість газових виходів до розламів консолідованої кори і верхньої мантії свідчать на користь абиогенної природи метану. Показано, що мікробного метагенезу в товщі голоценових опадів недостатньо для забезпечення такого потужної газової розвантаження дна Чорноморської мегавпадини.

Практична значимість. Так як обсяг вуглеводнів в глибинах Землі у багато разів перевищує початкові потенційні ресурси всього осадового чохла, слід розглядати його як перспективний ресурс видобутку.

Наукова новизна. Наведено дані на користь глибинної концепції походження метану дна Чорного моря.

Ключові слова: Чорне море, глибинний метан, дегазація дна Чорного моря, абиогенний природа метану, геологічний розлом, земна кора, мантія, газовиділення.

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Анализ происхождения глубинного метана дна Черного моря.

Методика. Анализ данных изотопного состава углерода метана Черноморской мегавпадины, анализ явлений активного газовыделения со дна Черного моря, геологическая интерпретация разрезов шельфа, анализ распределения сипов по глубине.

Результаты. В статье обсуждаются вопросы природы активного газовыделения дна Черного моря. Установлено, что термодинамический режим, ограниченное количество биомассы в земной коре Черного моря и приуроченность газовых выходов к разломам консолидированной коры и верхней мантии свидетельствуют в пользу абиогенной природы метана. Показано, что микробного метагенеза в толще голоценовых осадков недостаточно для обеспечения такого мощной газовой разгрузки дна Черноморской мегавпадины.

Практическая значимость. Так как объем углеводородов в глубинах Земли во много раз превышает начальные потенциальные ресурсы всего осадочного чехла, следует рассматривать его как перспективный ресурс добычи.

Научная новизна. Приведены данные в пользу глубинной концепции происхождения метана дна Черного моря.

Ключевые слова: Черное море, глубинный метан, дегазация дна Черного моря, абиогенная природа метана, геологический разлом, земная кора, мантия, газовыделение.

ABOUT AUTHORS

Е.Ф. Шнюков, ученый-геолог, академик НАН Украины, заслуженный деятель науки и техники Украины, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, действительный член Международной академии наук (МАН) Евразии, отделение морской геологии и осадочного рудообразования НАНУ, Киев, Украина.

В.П. Коболев, доктор геологических наук, профессор, главный научный сотрудник Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина.
E-mail: vpkobolev@ukr.net, тел. 050 493 44 45.